

УДК 621.941-529.004

Туромша В.И., Мищенко С.Н.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ РЕЗАНИЯ КОНТУРОВ, ЗАДАНЫХ СПЛАЙНАМИ

**Введение.** Аналитическое определение периода стойкости и величины износа инструмента является одной из актуальных задач технологии машиностроения, в частности, при математическом моделировании процессов обработки деталей на металлорежущих станках. Ее решение в условиях стационарного резания не вызывает трудностей и подробно описано в технической литературе [1].

При токарной обработке сложных контуров процесс резания является нестационарным, поскольку скорость резания  $V$  (м/мин) непрерывно изменяется в соответствии с изменением диаметра  $d$  (мм) обрабатываемой поверхности:

$$V = \frac{\pi d n}{1000},$$

где  $n$  – частота вращения шпинделя,  $\text{мин}^{-1}$ .

В работе [2] для нестационарных процессов резания с переменной скоростью резания получена математическая модель, позволяющая определить период стойкости  $T$  и величину износа резца  $h_p$ :

$$\begin{cases} T = C_T t^x S_o^y \frac{\tau_k - \tau_n}{\int_{\tau_n}^{\tau_k} \frac{d\tau}{V^\mu}} = C_T t^x S_o^y \left( \frac{\pi n}{1000} \right)^\mu \frac{\tau_k - \tau_n}{\int_{\tau_n}^{\tau_k} \frac{d\tau}{d^\mu}}, \\ h_p = C_V t^q S_o^u \times \int_{\tau_n}^{\tau_k} V^m d\tau = C_V t^q S_o^u \left( \frac{\pi n}{1000} \right)^m \times \int_{\tau_n}^{\tau_k} d^m d\tau \end{cases}, \quad (1)$$

где  $C_T, C_V, x, y, \mu, q, u, m$  – эмпирические параметры в степенных зависимостях для определения периода стойкости  $T$  и скорости изнашивания  $V_h$  инструмента при стационарном резании, т.е.  $T = C_T t^x S_o^y V^\mu$  и  $V_h = C_V t^q S_o^u V^m$  [3];  $\tau_n$  и  $\tau_k$  – соответственно время начала и конца обработки элементарной поверхности;  $t$  и  $S_o$  – соответственно глубина резания (мм) и подача (мм/об).

Возможность точного решения модели (1) и его трудоемкость определяется формой уравнения, описывающего обрабатываемый контур. В работе [2] получены решения лишь для отдельных элементарных поверхностей (конической, торцевой, сферической), образующая которых задана соответствующим математическим уравнением линии (прямой или кривой). В связи с этим представляет интерес разработка универсального алгоритма решения модели (1) для поверхности любой сложности, что облегчит его практическое

использование. Особенно важно это для контуров, аппроксимированных сплайнами, которые широко используются при разработке управляющих программ для станков с ЧПУ.

**Определение  $T$  и  $h_p$  при задании обрабатываемого контура уравнением в общем виде.** Из выражений (1) следует, что переменным параметром является диаметр обработки  $d$ , который, в свою очередь, определяется геометрией поверхности обрабатываемой детали. В общем случае при обработке контура (рис. 1), заданного в декартовых координатах уравнением  $Y = f(X)$ , диаметр обработки в любой момент времени равен  $d = 2Y = 2f(X)$ . Длина перемещения вершины резца вдоль образующей обрабатываемой поверхности за время  $\tau$  определяется выражением:

$$L = n S_o \tau = \int_0^x \sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx,$$

где  $f'(X)$  – первая производная от функции  $f(X)$ ;  $x$  – приращение координаты вершины резца по оси  $X$ .

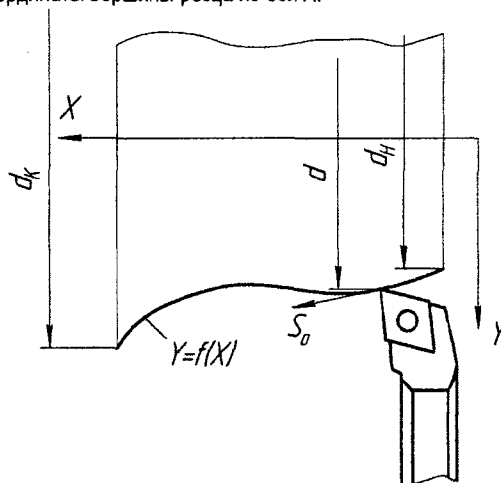


Рис. 1. Токарная обработка контура, заданного уравнением  $Y = f(X)$

Тогда время резания равно:

$$\tau = \frac{1}{nS_0} \int_0^x \sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx,$$

откуда

$$\tau_n = \frac{1}{nS_0} \int_0^{x_n} \sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx;$$

$$\tau_k = \frac{1}{nS_0} \int_0^{x_k} \sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx,$$

где  $X_n$  и  $X_k$  – координаты вершины резца по оси  $X$ , соответствующие началу и концу обработки элементарной поверхности  $Y = f(X)$ .

Значения  $X_n$  и  $X_k$  равны:

$$x_n = F(d_n)/2; \quad x_k = F(d_k)/2,$$

где  $F$  – обратная функция от  $Y = f(X)$ ;  $d_n$  и  $d_k$  – диаметры обрабатываемой поверхности, соответствующие координатам  $X_n$  и  $X_k$  вершины резца.

Используя приведенные выражения в модели (1), после замены переменной получим:

$$\begin{cases} T = C_T t^x S_0^y \left( \frac{2\pi n}{1000} \right)^u \int_{x_n}^{x_k} \sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx \\ h_p = C_V t^q S_0^u \left( \frac{2\pi n}{1000} \right)^m \times \int_{x_n}^{x_k} [f(X)]^m \sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx \end{cases} \quad (2)$$

Зависимости (2) позволяют определить период стойкости и величину износа инструмента при токарной обработке с переменной скоростью резания любых сложных контуров, заданных уравнением в декартовых координатах, в том числе и в форме сплайна.

Машинное время при обработке элементарной поверхности равно времени  $\tau$ , т.е.

$$t_M = \tau = \tau_k - \tau_n. \quad (3)$$

Уравнение для определения  $T$  может быть также записано в виде:

$$T = C_T t^x S_0^y v_{\text{экв}}^u, \quad (4)$$

где  $v_{\text{экв}}$  – эквивалентная скорость резания, т.е. постоянная скорость резания, которая оказывает такое же влияние на износ инструмента и его период стойкости, как и переменная скорость.

Соответственно эквивалентная скорость резания равна:

$$v_{\text{экв}} = \pi d_{\text{экв}} n / 1000, \quad (5)$$

где  $d_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр, т.е. такой постоянный диаметр обрабатываемой поверхности, который соответствует эквивалентной скорости резания.

Эквивалентный диаметр обработки в соответствии с моделью (2):

$$d_{\text{экв}} = \left[ \frac{2^u \int_{x_n}^{x_k} \sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx}{\int_{x_n}^{x_k} \frac{\sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx}{[f(X)]^m}} \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (6)$$

Рассмотрим решение задачи определения периода стойкости  $T$ , эквивалентного диаметра  $d_{\text{экв}}$ , величины износа резца  $h_p$  и машинного времени  $t_M$  с помощью зависимостей (2)–(6) при токарной обработке контуров, заданных сплайнами. Для сравнительной оценки точности разработанных моделей в качестве примера взяты поверхности, образующая которых может быть также описана уравнением кривой линии –

окружности, эллипса и гиперболы. Адекватность моделей оценивалась с помощью экспериментальных исследований.

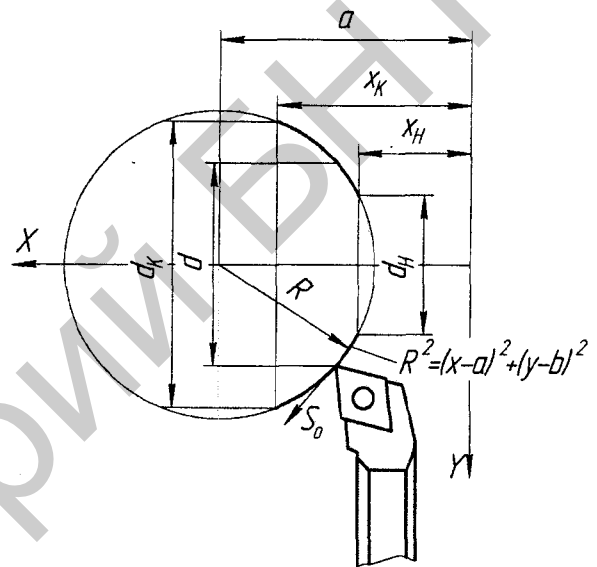
Расчеты выполнены на примере токарной обработки деталей из чугуна марки СЧ21 с твердостью 190 НВ. Материал резца – твердый сплав ВК6. Геометрические параметры резца:  $\varphi = 60^\circ$ ;  $\varphi_1 = 20^\circ$ ;  $\gamma = 7^\circ$ ;  $\alpha = 10^\circ$ ;  $\lambda = 0^\circ$ . Параметры модели (2) [1]:  $C_T = 215^\circ$ ;  $C_V = 0,2 \times 10^{-3}$ ;  $x = -0,75$ ;  $y = -1$ ;  $\mu = -5$ ;  $q = 0,7$ ;  $u = 0,8$ ;  $m = 2,02$ . Подача принята равной  $S_0 = 0,35$  мм/об, глубина резания –  $t = 1$  мм.

**Обработка сферической поверхности.** Уравнение окружности, являющейся образующей сферической поверхности (рис. 2, а), имеет вид:

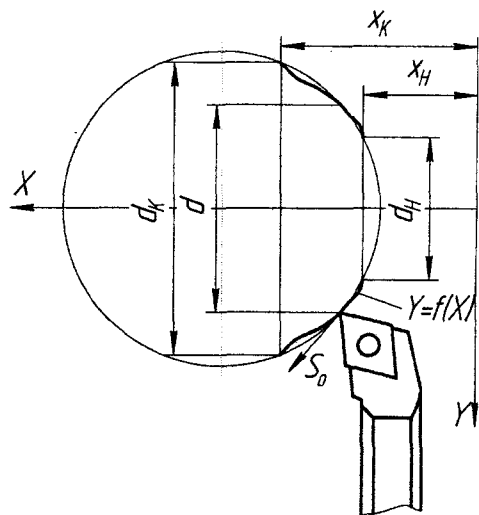
$$R^2 = (x - a)^2 + (y - b)^2,$$

где  $a$  и  $b$  – смещение центра окружности соответственно по осям  $X$  и  $Y$ ;  $R$  – радиус.

а)



б)



**Рис. 2.** Точение сферической поверхности с переменной скоростью резания: а – задание образующей уравнением окружности; б – задание образующей сплайном

Зададим  $R = 75$  мм и  $a = 75$  мм. Тогда зависимости  $Y = f(X)$  и  $f'(X)$  после преобразования примут вид:

Таблица 1. Результаты расчета  $T$ ,  $d_{\text{экв}}$ ,  $h_p$  и  $t_m$  при обработке сферической поверхности

Форма задания образующей	$d_H$ , мм	$d_K$ , мм	$x_H$ , мм	$x_K$ , мм	$d_{\text{экв}}$ , мм	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$v_{\text{экв}}$ , м/мин	$T$ , мин	$h_p$ , мкм	$t_m$ , мин
Уравнение окружности	75	150	10	75	131	300	124	46	1,08	0,74
Сплайн-функция			10	75	133		125	48	1,07	0,75

$$y = \sqrt{75^2 - (x - 75)^2}; y' = \frac{2x - 150}{2[5625 - (x - 75)^2]^{\frac{1}{2}}}$$

Эту же образующую сферической поверхности аппроксимируем сплайном (рис. 2,б):

$$y = 4 \times 10^{-8} x^5 - 9 \times 10^{-8} x^4 + 0,00096 x^3 - 0,063 x^2 + 2,68 x + 16,05.$$

Тогда

$$y' = -0,126x + 0,00288x^2 - \frac{9x^3}{250000} + \frac{x^4}{5000000} + 2,68.$$

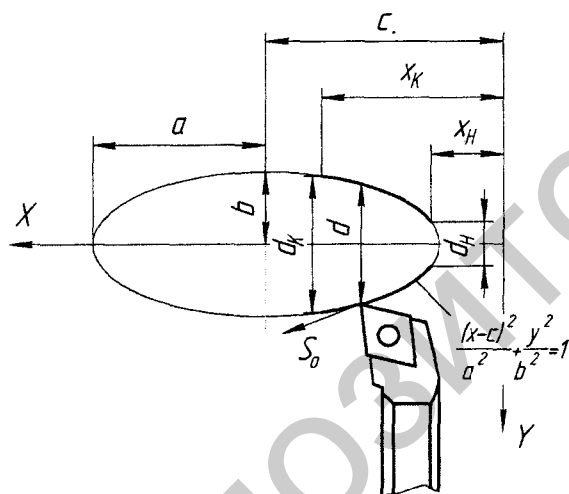
Результаты расчета в соответствии с моделями (2)–(6) приведены в табл. 1.

**Обработка эллиптической поверхности.** Уравнение эллипса, являющегося образующей эллипсоида (рис. 3,а):

$$\frac{(x-c)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

где  $c$  – смещение центра эллипса по оси  $X$ ;  $a$  и  $b$  – длина соответственно большей и малой полуосей эллипса.

а)



б)

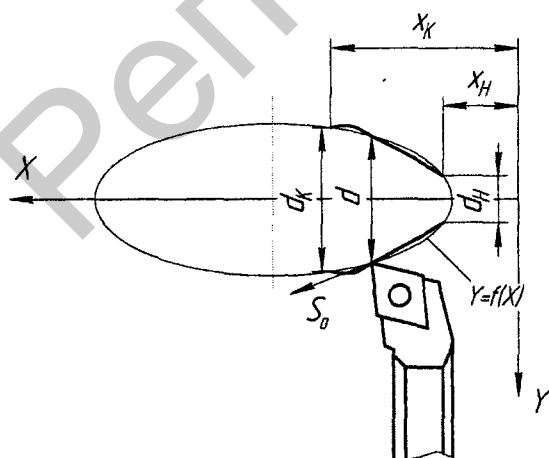


Рис. 3. Точение эллипсоида с переменной скоростью резания: а – задание образующей уравнением эллипса; б – задание образующей сплайном

Примем  $a = 200$  мм;  $b = 100$  мм;  $c = 200$  мм. Тогда уравнение

эллипса  $Y = f(X)$  в декартовых координатах будет иметь вид:

$$y = \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2}(x-c)^2} = \sqrt{100^2 - \frac{1}{4}(x-200)^2},$$

а первая производная

$$y' = \frac{1}{4[(-x^2) + 400x]^{\frac{1}{2}}} [-2x + 400].$$

После аппроксимации образующей эллипсоида с помощью сплайна (рис. 3,б) получим:

$$y = -3 \times 10^{-6} x^4 + 5,6 \times 10^{-4} x^3 - 0,044 x^2 + 2,244 x + 12,55;$$

$$y' = \frac{-3}{250000} x^3 + 0,168 \times 10^{-2} x^2 - 0,88 \times 10^{-1} x + 2,244.$$

Результаты расчета в соответствии с моделями (2)–(6) приведены в табл. 2.

**Обработка гиперболической поверхности.** Уравнение гиперболы, являющейся образующей поверхности (рис. 4,а), в общем виде

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

где  $a$  и  $b$  – соответственно действительная и мнимая полуоси гиперболы.

а)

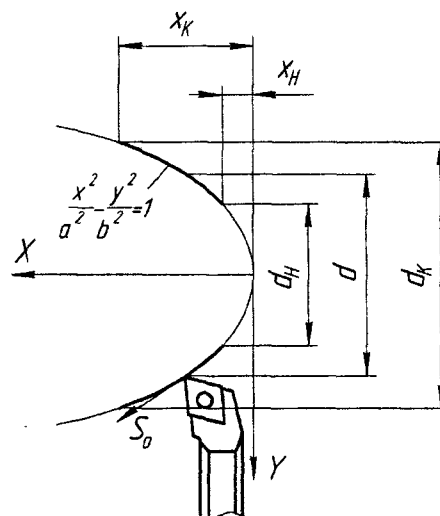


Таблица 2. Результаты расчета  $T$ ,  $d_{эке}$ ,  $h_p$  и  $t_m$  при обработке эллиптической поверхности

Форма задания образующей	$d_H$ , мм	$d_K$ , мм	$x_H$ , мм	$x_K$ , мм	$d_{эке}$ , мм	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$V_{эке}$ , м/мин	$T$ , мин	$h_p$ , мкм	$t_m$ , мин
Уравнение эллипса	50	150	6,35	67,7	119	300	112	75	0,91	0,77
Сплайн-функция			6,35	67,7	118		111	77	0,89	0,76

Таблица 3. Результаты расчета  $T$ ,  $d_{эке}$ ,  $h_p$  и  $t_m$  при обработке гиперболической поверхности

Форма задания образующей	$d_H$ , мм	$d_K$ , мм	$x_H$ , мм	$x_K$ , мм	$d_{эке}$ , мм	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$V_{эке}$ , м/мин	$T$ , мин	$h_p$ , мкм	$t_m$ , мин
Уравнение гиперболы	60	75	70,7	80	68	500	107	94	0,35	0,068
Сплайн-функция			70,7	80	69		108	89	0,36	0,069

б)

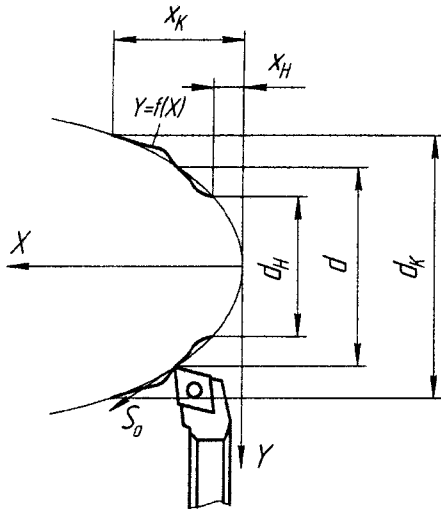


Рис. 4. Обработка гипербоида с переменной скоростью резания: а – задание образующей уравнением гиперболы; б – задание образующей сплайном

Зададим  $a = 50$  мм и  $b = 30$  мм. Тогда уравнение гиперболы:

$$\frac{x^2}{50^2} - \frac{y^2}{30^2} = 1.$$

После преобразования получим:

$$y = \sqrt{\frac{9}{25}x^2 - 900}; \quad y' = \frac{3x}{(15x^2 - 22500)^{1/2}}.$$

После аппроксимации гиперболы сплайном (рис. 4,б) получим:

$$y = 1 \times 10^{-4}x^3 - 0,02627x^2 + 3,086x - 91,96;$$

$$y' = \frac{3x^2}{10000} - 0,052524x + 3,086.$$

Результаты расчета в соответствии с моделями (2)–(4) приведены в табл. 3.

Анализ полученных результатов (табл. 1–3) показывает, что при замене математического уравнения образующей контура (окружности, эллипса, гиперболы и др.) аппроксимирующим сплайном результаты расчета  $T$ ,  $h_p$  и  $t_m$  при обработке деталей с переменной скоростью резания отличаются незначительно. Это обеспечивает высокую точность моделирования процессов резания и упрощает процесс подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ.

**Обработка конической и торцевой поверхностей.** Обрабатываемой конической поверхности является прямая линия, и это существенно упрощает решение модели (1). Зависимости для определения эквивалентного диаметра, периода стойкости, величина износа реза и машинного времени имеют вид:

$$d_{эке} = \left[ \frac{(1-\mu)(d_K - d_H)}{d_K^{1-\mu} - d_H^{1-\mu}} \right]^{\frac{1}{\mu}};$$

$$T = C_T t^x S_0^y \left( \frac{\pi n}{1000} \right)^{\mu} \frac{(1-\mu)(d_K - d_H)}{d_K^{1-\mu} - d_H^{1-\mu}};$$

$$h_p = C_V t^q S_0^u \left( \frac{\pi n}{1000} \right)^m \frac{d_K^{m+1} - d_H^{m+1}}{2n S_0 \sin \alpha (m+1)};$$

$$t_m = \frac{d_K - d_H}{2n S_0 \sin \alpha},$$

где  $\alpha$  – половина угла при вершине конуса.

При  $d_H = 50$  мм,  $d_K = 120$  мм,  $\alpha = 10^\circ$  и  $n = 300$  мин<sup>-1</sup> получим:  $d_{эке} = 93,4$  мм,  $V_{эке} = 78,9$  м/мин,  $T = 250$  мин,  $h_p = 1,23$  мкм,  $t_m = 1,92$  мин.

Обработка торцевой поверхности является частным случаем обработки конуса с углом при вершине  $\alpha = 90^\circ$ . При  $d_H = 60$  мм,  $d_K = 120$  мм и  $n = 500$  мин<sup>-1</sup> получим:  $d_{эке} = 96$  мм,  $V_{эке} = 90,5$  м/мин,  $T = 216$  мин,  $h_p = 0,2$  мкм,  $t_m = 0,29$  мин.

**Обработка сложных контуров (совокупности элементарных поверхностей) с переменной скоростью резания.** Реальные поверхности деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ, обычно представляют собой совокупность нескольких элементарных поверхностей. Рассмотрим обработку одним инструментом сложного контура, одна часть которого включает образующие торцевой, конической, сферической и эллиптической поверхностей, а другая задана сплайном (рис. 5). Выполним расчет при  $n = 300$  мин<sup>-1</sup>.

Контур, заданный сплайном    Эллипсоид    Сфера    Конус    Торец

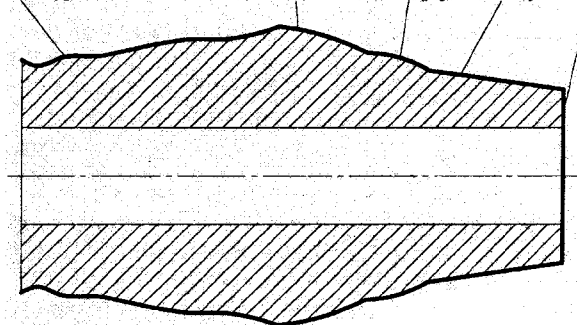


Рис. 5. Сложный контур, состоящий из образующих нескольких элементарных поверхностей

Математические зависимости, позволяющие определить  $T$ ,  $h_p$  и  $t_m$ , в этом случае имеют вид [2]:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^N t_{mi}}{\sum_{i=1}^N \frac{t_{mi}}{T_i}}; \quad (7)$$

Таблица 4. Результаты моделирования износа и стойкости инструмента при обработке сложного контура

Элементарная поверхность	Параметры образующей	$d_n$ , мм	$d_k$ , мм	$d_{экв}$ , мм	$V_{экв}$ , м/мин	$T_i$ , мин	$h_{pi}$ , мкм	$t_{mi}$ , мин
Торец	$\alpha = 90^\circ$	60	100	83	78,4	444	0,60	1,10
Конус	$\alpha = 10^\circ$	100	110	105	99,0	137	0,51	0,55
Сфера	$R = 80$ мм	110	160	147	138,5	25,8	1,08	0,62
Эллипсоид	$a = 200, b = 100$	160	180	171	161,0	12	0,92	0,33
Контур, заданный сплайном	$y = -9 \times 10^{-9} x^5 + 2 \times 10^{-6} x^4 - 9 \times 10^{-5} x^3 + 0,247x + 90$	180	126	190,5	179,5	4,26	3,61	0,96

$$h_p = \sum_{i=1}^N h_{pi}; \quad (8)$$

$$t_m = \sum_{i=1}^N t_{mi}, \quad (9)$$

где  $T_i$ ,  $h_{pi}$  и  $t_{pi}$  – соответственно период стойкости, величина износа резца и машинное время при точении  $i$ -й элементарной поверхности;  $N$  – число элементарных поверхностей на детали.

Результаты расчета периода стойкости, величины износа инструмента и машинного времени приведены в табл. 4.

Время на обработку контура составит:

$$t_m = 1,10 + 0,55 + 0,62 + 0,33 + 0,96 = 3,56 \text{ мин.}$$

Период стойкости инструмента:

$$T = \frac{3,56}{\frac{1,10}{444} + \frac{0,55}{137} + \frac{0,62}{25,8} + \frac{0,33}{12} + \frac{0,96}{4,26}} = 12,56 \text{ мин.}$$

Износ инструмента за время обработки детали:

$$h_p = 0,60 + 0,51 + 1,08 + 0,92 + 3,61 = 6,72 \text{ мкм.}$$

Таким образом, разработанные математические модели (2–9) позволяют определить период стойкости, величину износа инструмента и время резания при обработке с переменной скоростью резания сложных контуров, включающих несколько элементарных поверхностей. Такие модели могут быть использованы как при нормировании операций обработки деталей на токарных многоцелевых станках, так и для оптимизации режима резания методами математического моделирования.

**Оценка адекватности математических моделей износа и стойкости инструмента при обработке деталей с переменной скоростью резания.** Проверка адекватности математических моделей осуществлялась путем сравнения результатов расчета по формулам (2–9) с экспериментальными данными.

Исследования выполнялись на примере токарной обработки с переменной скоростью резания деталей с коническими (наружными и внутренними) и сферическими поверхностями, а также сложного контура, включающего конус, цилиндр, сферу и др. Эксперименты проводились на двухосевом токарном станке с ЧПУ мод. Hawk 200 фирмы Cincinnati с системой ЧПУ «GE-Fanuc 21i-TA», обеспечивающей обработку любых фасонных поверхностей вращения. Моделирование обработки и создание управляющей программы для станка производилось в среде Pro/Engineer (рис. 6).

В соответствии с рекомендациями [4] в качестве критерия стойкости резца был принят размерный износ  $h_r$ . Определение величины  $h_r$  осуществлялось с помощью измерительной системы линейных перемещений станка и устройства ЧПУ. Для этого производилась привязка резца к системе отсчета станка и вычисление вылета резца.

В начале эксперимента в память УЧПУ вводился плавающий ноль, равный нулю, и вылет резца, равный нулю. Затем производилось обтачивание цилиндрического участка на заготовке, отвод суппорта по координате  $Z$  и измерение диаметра  $d_1$  обточенной части заготовки с помощью рычажной индикаторной скобы СРП 213-802 с погрешностью 0,001 мм. Диаметр  $d_1$  вводился под адресом  $X$ , а на

экране дисплея высвечивался номер резца и вычисленное значение вылета резца  $X_1$  по координате  $X$  относительно начала координат.

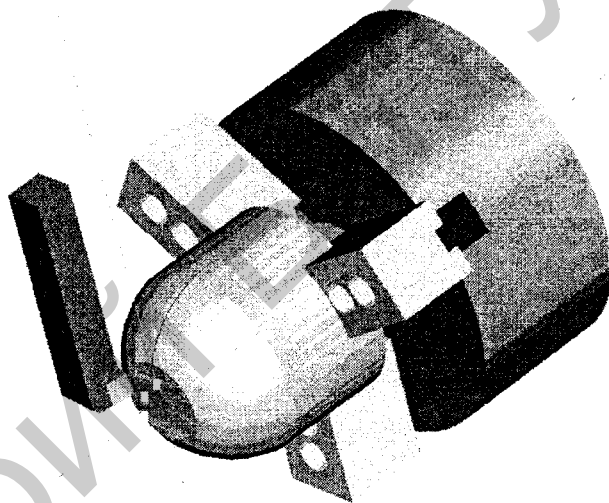


Рис. 6. Моделирование обработки сложного контура с переменной скоростью резания в среде Pro/Engineer

После обработки определенного числа контуров (или в заданные моменты времени резания) снова производилось обтачивание цилиндрического участка и измерение его диаметра  $d_2$ . Затем операция привязки резца повторялась и определялась величина вылета резца  $X_2$ . Разность  $|X_1 - X_2|$  равна величине радиального износа резца  $h_r$ . Разность вылетов нового резца и при достижении им величины предельного размерного износа  $H_r$  равна величине  $h_r$  за время резания, равное периоду стойкости  $T$ .

Сравнение расчетных и экспериментальных данных осуществлялось по двум критериям – по величине предельного размерного износа  $H_r$  и по периоду стойкости  $T$ .

Связь между величинами  $H_r$  и  $T$  в период нормального изнашивания определяется зависимостью [3]:

$$H_r = V_h T + h_0 = h_r \frac{T}{\tau} + h_0, \quad (10)$$

где  $V_h$  – скорость изнашивания резца, мкм/мин;  $T$  – заданный период стойкости, мин;  $h_0$  – величина начального износа, определяемая величиной отрезка, отсекаемого на оси ординат прямой  $h_r = f(\tau)$ , соответствующей периоду нормального изнашивания резца, мкм.

Скорость размерного изнашивания определяется как

$$V_h = \frac{h_r}{\tau}, \quad (11)$$

где  $h_r$  – величина размерного износа за время резания  $\tau$ .

При расчете  $H_r$  в формуле (11) используются значения  $h_r$ , определяемые по модели (2) за время резания  $\tau$ , т.е. применяется теоретическая зависимость  $h_r = f(\tau)$ . Для оценки адекватности разработанных моделей расчетная величина предельного размерного износа сравнивалась с величиной, полученной экспериментально.

Таблица 5. Оценка погрешности математических моделей

Обрабатываемая поверхность	$T$ , мин	$M(T)$ , мин	$\delta_T$ , %	$H_r$ , мкм	$M(H_r)$ , мкм	$\delta_{H_r}$ , %
Торец	54	58,7	8,0	84	78,4	7,1
Конус	54	49,1	10,0	84	93,0	9,7
Совокупность конуса, цилиндра, сферы	45	49,8	9,7	65	60,2	8,0

При использовании в качестве критерия износа резца периода стойкости, в качестве аргумента использовался предельный размерный износ, определяемый экспериментально, т.е.  $H_{r3}$ . Соответствующий ему период стойкости определяется по зависимости, получаемой из уравнения (10)

$$T = \frac{H_{r3} - h_0}{V_h},$$

где для определения скорости размерного изнашивания используются экспериментальные значения  $h_r$  за время  $T$ , т.е. применяется экспериментальная зависимость  $h_r = f(T)$ .

Статистическая оценка результатов экспериментов производилась по общеизвестным методикам. Математическое ожидание величины радиального износа и периода стойкости определялось по формулам:

$$M(h_r) = \sum_{i=1}^n h_{ri} p_i; \quad M(T) = \sum_{i=1}^n T_i p_i,$$

где  $h_{ri}$ ,  $T_i$ ,  $p_i$  – радиальный износ, период стойкости и частоты, соответствующие этим величинам в  $i$ -ом эксперименте,  $n$  – число экспериментов.

Значения  $M(h_r)$  и  $M(T)$  затем сравнивались с расчетными, полученными по теоретическим зависимостям.

Погрешности определения радиального износа  $\delta_{H_r}$  и периода стойкости  $\delta_T$  составляют:

$$\delta_{H_r} = \frac{H_r - H_{r3}}{H_{r3}} \cdot 100\%; \quad \delta_T = \frac{T - T_3}{T_3} \cdot 100\%,$$

где  $H_r$  и  $T$  – расчетные значения предельного радиального износа и периода стойкости;  $H_{r3}$  и  $T_3$  – фактические (экспериментальные) значения этих величин.

Результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных представлены в табл. 5. Погрешность расчета радиального износа и периода стойкости при обработке различных сложных поверхностей с переменной скоростью резания составляет

соответственно 7,1–9,7 % и 8,0–10,0 %, что свидетельствует об адекватности разработанных математических моделей.

**Заключение.** Анализ полученных результатов показывает следующее:

1. Разработанные математические модели позволяют определить период стойкости, величину износа инструмента и машинное время при обработке деталей с переменной скоростью резания для любого аналитически описываемого контура, включая контуры, заданные сплайнами.
2. Результаты расчета при описании контура детали аппроксимирующим сплайном практически совпадают с результатами при задании контура математическим уравнением.
3. Использование сплайн-функций в виде полинома позволяет использовать разработанные модели стойкости и величины износа инструмента при программировании обработки сложных контуров средствами современных систем ЧПУ.
4. Экспериментальные исследования показали, что погрешность расчета радиального износа и периода стойкости инструмента при обработке деталей сложной формы с переменной скоростью резания составляет около 10,0 %, что свидетельствует об адекватности разработанных математических моделей.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / редкол.: под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.
2. В.И. Туромша, Чан Ким Тоан. Токарная обработка деталей сложной формы с переменной скоростью резания. // Весці Акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1995. – №2. – С. 48–53.
3. Ящерицын, П.И. Период стойкости и износ резцов при нестационарном резании на токарных станках с ЧПУ / П.И. Ящерицын, В.И. Туромша, Чан Ким Тоан // Весці Акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1993. – №4. С. 40–47.
4. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

Материал поступил в редакцию 05.10.10

#### TUROMSHA V.I., MISHCHENKO S.N. Modeling of stability of the tool at processing with variable speed of cutting of contours given spline

The developed mathematical models allow to define the period of stability, size of deterioration of the tool and machine time at processing details with variable speed of cutting on turning machine tools with NSC for any analytically described contour, including contours given spline. The analysis of results of modeling on an example spherical, elliptic, hyperbolic etc. surfaces given by the equation and approximate spline, shows high accuracy of the developed mathematical models. The error of account of radial deterioration and period of stability in relation to experimental data does not exceed 10 %, that confirms adequacy of the developed mathematical models.